

prof. dr hab. inż. Władysław Kryłłowicz, dr inż. Krzysztof Kantyka, dr inż. Michał Kuczowski,
Instytut Maszyn Przepływowych, Politechnika Łódzka

Hybrydowe siłownie ORC

Artykuł dotyczy przeprowadzonych w Instytucie Maszyn Przepływowych Politechniki Łódzkiej prac, dotyczących koncepcji mikrosiłowni typu hybrydowego, opartych o organiczny obieg Rankina (ORC). Jako siłownię hybrydową rozumiemy tutaj siłownię dwupaliwową, wykorzystującą dwa źródła energii: energię geotermalną oraz energię biomasy. Omówiono szczegółowo wyniki badań prowadzonych na zbudowanym w Łodzi stoisku mikrosiłowni hybrydowej. Opracowano również projekt innego typu siłowni hybrydowej przeznaczonej dla jednej z polskich stacji geotermalnych.

Niniejszy artykuł stanowi podsumowanie doświadczeń IMP PŁ w dziedzinie techniki hybrydowej (dwupaliwowej) siłowni opartej o organiczny obieg Rankina (ORC). Prowadzone w tej dziedzinie prace były finansowane w ramach dwóch projektów NCBiR: Nr R0600901 [3], Nr R06002106 [6] oraz w ramach bezpośredniej współpracy z gminą Uniejów, na terenie której funkcjonuje ciepłownia geotermalna.

Sprawność maszyn ciepłych jest ograniczona temperaturami dolnego i górnego źródła ciepła. Teoretyczna sprawność Carnota, wyrażona wzorem:

$$\eta_c = 1 - T_d / T_g$$

przedstawia się dla różnych typów siłowni ciepłych następująco (tab.1).

W Europie najniższa temperatura

Tab. 1. Teoretyczna sprawność Carnota dla różnych typów siłowni ciepłych (dla obiegu ORC przyjęto temperaturę górną równą 383 K (110 °C)).

Typ siłowni	Temperatura źródła górnego [K]	Temperatura źródła dolnego [K]	Sprawność obiegu Carnota η_c [-]
gazowo-parowa	1473	300	0,790
gazowa	1473	687	0,510
parowa	833	300	0,628
geotermalna	383	300	0,208
maretermiczna	301	278	0,079

źródła wynosi 98 °C (doświadczalna siłownia Neustadt-Glewe), a dla siłowni komercyjnych 106 °C (siłownia Altheim, Austria, por.[3]).

W USA na Alasce funkcjonują siłownie geotermalne o jeszcze niższych temperaturach górnych, ale w tym przypad-

ku mamy przez cały rok stabilne niskie temperatury źródła dolnego, bliskie 0 °C lub jeszcze niższe. Widzimy zatem, że w polskich warunkach geologicznych (patrz Górecki [2]) sprawności geotermalnych siłowni będą raczej niskie. Droga do podwyższenia sprawności może

być podniesienie temperatury czynnika roboczego poprzez spalanie innych paliw, w tym i biomasy.

Doświadczalna hybrydowa siłownia ORC zbudowana w IMP PŁ

W oparciu o prace teoretyczne przeprowadzone w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym (Borsukiewicz, Nowak i Stachel [1]) zbudowana została w IMP PŁ doświadczalna siłownia hybrydowa. Jej schemat ideowy przedstawiono na rys.1.

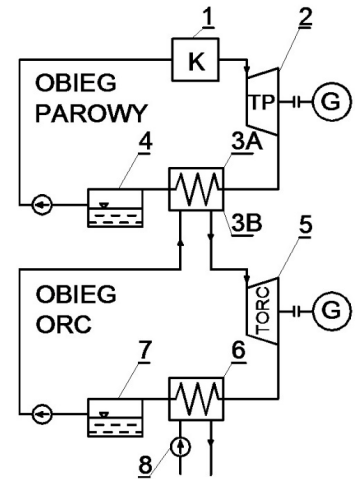
Siłownia składa się z dwu sprzężonych ze sobą obiegów: parowego obiegu górnego (wysokotemperaturowego) oraz dolnego obiegu ORC (niskotemperaturowego). Obieg górny obejmuje kocioł parowy - 1, mikroturbinę parową - 2, skraplaczo-parownik - 3, zbiornik wody zasilającej - 4. Obieg dolny składa się z turbiny ORC - 5, zasilanej parą czynnika niskowrzącego wytwarzaną w parowniku 3B, skraplacza - 6 schładzanego wodą dostarczaną przez pompę wody - 8. Kluczową rolę odgrywa tutaj skraplaczo-parownik - 3, którego strona 3A tworzy skraplacz dla obiegu parowego, a strona 3B jest parownikiem obiegu ORC. Analogicznie jak na rys.2 przed parownikiem 3B można zabudować podgrzewacz geotermalny.

Jako czynnik roboczy wybrano HFE 7100, charakteryzujący się zerową wartością wskaźnika ODP oraz niską GWP, a także jest niezbyt agresywny chemicznie. Ponadto jest to czynnik tzw. „suchy” - po rozprężeniu pozostajemy w obszarze pary przegrzanej.

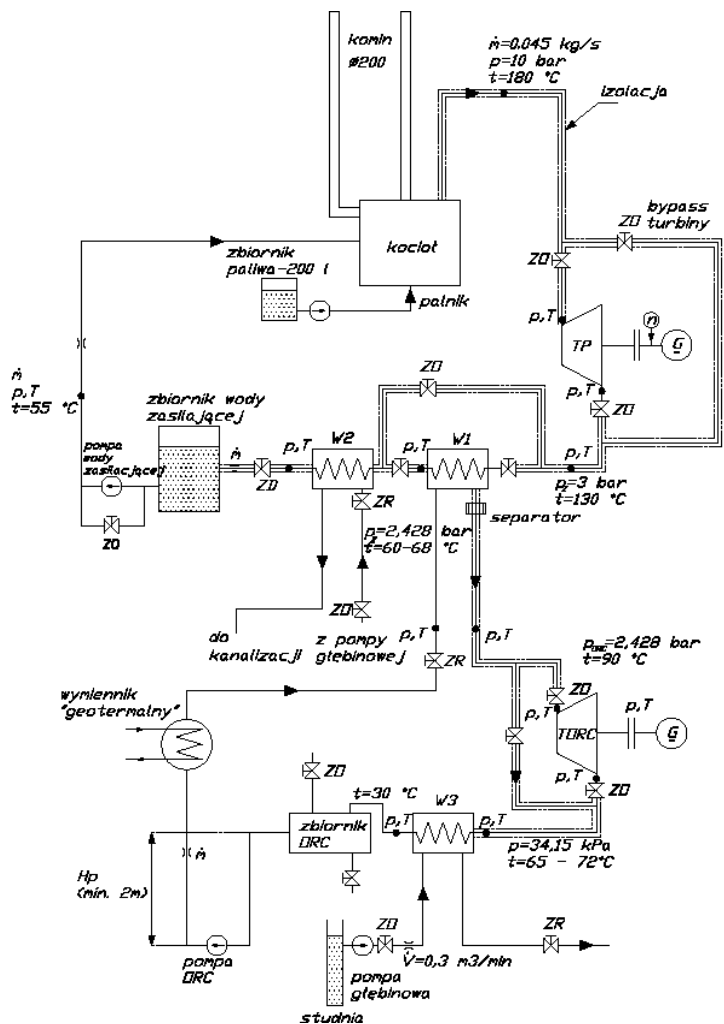
Na rys.2 przedstawiono dokładny schemat mikrosiłowni wraz ze wszystkimi układami pomocniczymi. Na schemacie naniesiono wszystkie parametry termodynamiczne, odnoszące się do nominalnego stanu pracy (osiągniętego również eksperymentalnie!).

Należy zauważyć, że stoisko siłowni zostało zbudowane w skali „ćwierćtechnicznej”, to znaczy, że wszystkie zbiorniki ciśnieniowe i rurociągi z armaturą są wykonane zgodnie z wymogami UDT.

Jako górne źródło ciepła zastosowano kocioł parowy produkcji firmy Budkot Pleszew o wydatku 0,045 kg/s przy ciśnieniu nominalnym 0,1 MPa i temperaturze 453 K (180 °C). Ze względów bezpieczeństwa zrezygnowano z palnika na biomasę, stosując zwykły palnik olejowy. Geotermalny podgrzewacz cieczy niskowrzącej symulowano przy pomocy oporowych elementów grzejnych zamontowanych na rurociągu. Bez podgrzewu cieczy jej temperatura nie przekraczała granicy 303 K (30 °C), z podgrzewem przekraczała 330 K. Wymogi hermeticznosci obiegu ORC spełniono zastępując (w miarę możliwości) złącza śrubowe połączeniami spawanymi.



Rys. 1. Schemat ideowy siłowni hybrydowej zbudowanej w IMP PŁ



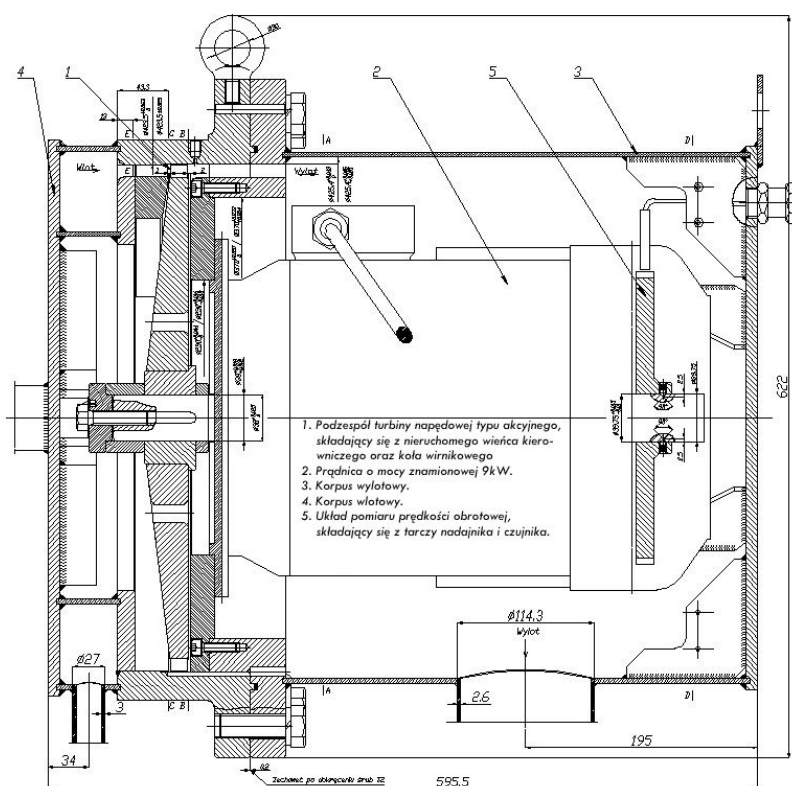
Rys. 2. Schemat mikrosiłowni hybrydowej z naniesionymi parametrami pracy (punkt nominalny)

Oba turbozespoły również zostały skonstruowane w IMP PŁ. Przekrój podłużny hermetycznego turbogeneratora ORC pokazano na rys. 3. Turbina napędowa jest jednostopniową turbiną akcyjną o częściowym łuku zasilania. Koło wirnikowe umieszczono bezpośrednio na wale prądnicy synchronicznej z magnesami trwałymi o nominalnej mocy 9 kW i napięciu znamionowym 400 V przy prędkości obrotowej 3000 obr./min (50 Hz). Podczas badań uzyskano moc wewnętrzną turbiny równą 7,45 kW, przy sprawności wewnętrznej 0,67. Relatywnie mała sprawność turbiny wynika po pierwsze z małej wysokości łopatek, a po drugie z wysokich liczb Macha, co jest zresztą charakterystyczne dla większości turbin ORC. Rozprężony w ułotkowaniu turbiny czynnik omywa uzwojenie generatora i spełnia rolę czynnika chłodzącego. Ten typ hermetycznego turbogeneratora ORC jest chroniony patentem. Regulacji obciążenia turbiny dokonywano włączając równolegle trzy handlowe termowentylatory.

Druga z turbin - parowa jest niestandardowym stopniem Curtisa o przepływie dośrodkowym i częściowym łuku zasilania. Jej moc wewnętrzna wynosi 5,23 kW przy sprawności wewnętrznej rzędu 0,567. W punkcie nominalnym turbina pracuje przy prędkości obrotowej 7500 obr./min. Zamiast generatora w celu stabilnego obciążenia turbiny parowej zastosowano hamulec wiroprądowy firmy Schenck. Turbina jest łożyskowana tocznie i regulowana dławieniowo.

Wszystkie wymienniki są typu płytowego, ze zgrzewanymi warstwami, dostarczyła je niemiecka firma Thermo-wave. Również pompa zasilająca obieg ORC jest produkcji niemieckiej (firma Hermetic). Ze względu na niskie ciśnienie w skraplaczu (rzędu 34 kPa) pompa ta umieszczona została znacznie poniżej poziomu układu ORC.

Jeżeli porównamy ze sobą dwa schematy stoiska: ideowy z rys. 1 i rzeczywisty z rys. 2, to widzimy wyraźnie stopień komplikacji rzeczywistego układu. Przede wszystkim każda z turbin jest wyposażona w rurociąg obejściowy wraz



Rys. 3. Przekrój podłużny turbogeneratora ORC (wg [4])

z zaworem regulacyjno-odcinającym, konieczny podczas rozruchu. Ponadto za skraplacz-parownikiem (oznaczonym na rys. 2 jako W3) zabudowano dodatkowy dochtładzacz W2 spełniający rolę wymiennika rozruchowego oraz mający rolę dodatkowego stabilizatora cieplnego. Skraplacz obiegu ORC jest zasilany wodą ze studni głębinowej poprzez zbiornik buforowy (nie pokazany na rysunku). Należy podkreślić, że te dodatkowe elementy są niezbędne również w przypadku budowy komercyjnej siłowni tego typu, niezależnie od jej mocy.

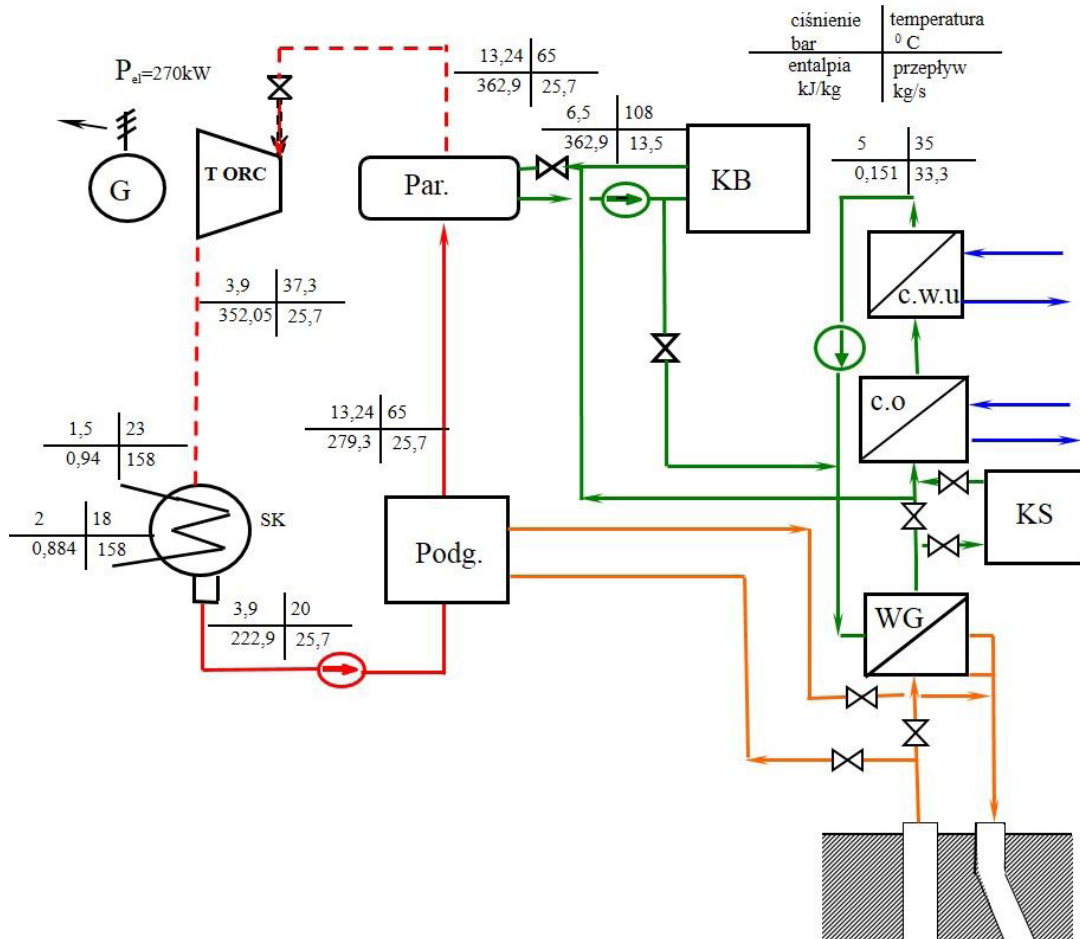
■ Projekt siłowni „Geo-Bio” dla stacji geotermalnej Uniejów

Na rys. 4 widzimy schemat funkcjonalny koncepcyjnej siłowni hybrydowej przeznaczonej dla stacji geotermalnej w Uniejowie. Wybór takiego układu był

uwarunkowany faktem, że nowo projektowana siłownia miała być „dobudowana” do istniejącego układu ogrzewania miasta i basenów termalnych.

Również w tym przypadku energia geotermalna jest wykorzystywana do wstępnego podgrzewu czynnika ORC, odparowywanego w parowniku zasilanym z kotła biomasowego KB. Przewidywana moc turbiny to 270 kW, w tym ok. 42% mocy pochodzi z energii cieplnej wód geotermalnych. Ograniczeniem mocy turbiny jest tu ilość biomasy dostępnej na terenie gminy Uniejów (ok. 5000 ton rocznie). Przewidywana produkcja ciepła (w tym również i ciepła niskotemperaturowego) została oszacowana na ok. 42 GJ/r.

Przyjęto, że nowy kocioł na słomę oraz ujęcie wody geotermalnej pracują przez cały rok, za wyjątkiem okresów przeznaczonych na konserwację i remonty.



Rys. 4. Schemat siłowni hybrydowej „Geo-Bio” przeznaczonej dla stacji geotermalnej w Uniejowie (wg [3])

■ Podsumowanie

Oceniając przedstawione powyżej wyniki eksperymentów i doświadczenia eksploatacyjne siłowni hybrydowej zbudowanej w IMP PŁ należy stwierdzić, że krajowy stan wiedzy pozwala już na budowę pierwszej siłowni komercyjnej. Siłownia taka powinna być jednak częściowo sponsorowana przez państwo, co jest zjawiskiem normalnym dla nowych technologii. Ryzyko budowy takiej siłowni jest dwojakie: ryzyko geologiczne (nie występuje, jeżeli wykorzystujemy istniejące otwory) oraz ryzyko eksploatacyjne, związane z brakiem kryteriów oceny trwałości podstawowych węzłów konstrukcyjnych, takich jak na przykład uszczelnienia i tożyskowanie turbin.

Drugi typ siłowni („Geo-Bio”) jest natomiast polecany dla już istniejących sta-

cji geotermalnych, z uwagi na możliwość dobudowy do istniejących instalacji.

Literatura:

1. Borsukiewicz-Gozdur A., Nowak W., Stachel A.: *Utilisation of geothermal energy in a geothermal hybrid power plant as compared with that in a traditional geothermal ORC power plant*, CMP Turbomachinery No.133, str.69-76, Łódź 2008.
2. Górecki W., Kuźniak T.: *Zasoby wód i energii geotermalnej na Niżu Polskim oraz możliwości ich przemysłowego wykorzystania, materiały konferencji: Odnawialne Źródła Energii u Progu XXI Wieku*, s.181-189, Warszawa 10-11 XII 2001.
3. Hanausek P., Krysiński J., i inni: *Hybrydowe siłownie geotermalne z wykorzystaniem biomasy i źródeł o niskiej entalpii*, raport z projektu badawczego nr. R06 009 01, Łódź 2009.

4. Klonowicz P., Borsukiewicz-Gozdur A., Hanausek P., Krytłowicz W., Brueggeman D.: *Design and performance measurement of an organic vapour turbine*, Applied Thermal Engineering, Volume: 63, Issue: 1, pp. 297-303, February 2014.
5. Krytłowicz W.: *Program funkcjonalno-użytkowy elektrociepłowni hybrydowej w Uniejowie*, praca niepublikowana IMP PŁ nr. 1676, Łódź 2010.
6. Krytłowicz W., Chodkiewicz W., Fodemski T., Antczak Ł. i inni: *Prace teoretyczne i budowa stoiska doświadczalnego mikrosiłowni przeznaczonej do badań hybrydowych obiegów Rankine'a dla potrzeb energetyki rozproszonej*, raport z projektu NCBiR nr. R06 002 106/2009, Łódź 2012.